بررسی تأثیر روش‌های مختلف اتصال صفحات GFRP بر شکل پذیری و رفتار درون صفحه‌ای دیوارهای بنایی *

محمدرضا افتخار[۱] مهران امامی[۲]

چکیده یکی از روش‌هایی که اخیراً برای مقاوم سازی و بهسازی لرزه‌ای اعضای سازه‌های بنایی و بتنی متداول شده است، استفاده از انواع الیاف پلیمری (FRP) است. از جمله مسائل مهم در تقویت دیوارهای بنایی توسط FRP، جداشدگی ورقه‌های مذکور از سطح دیوار می‌باشد. در این تحقیق به بررسی تأثیر روش‌های آماده سازی سطح دیوار بر ظرفیت باربری و شکل پذیری دیوارهای بنایی تقویت شده با ورقه‌های FRP پرداخته شده است. برای اتصال صفحات تقویتی به سطح دیوار، از روش‌های نظیر سوراخ زنی، شیار زنی، آماده سازی سطحی و میخ گذاری استفاده شده است. در این تحقیق، ۱۱ نمونه دیوار بنایی ساخته شده و تحت بارگذاری کشش قطری قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که شکل‌پذیری نمونه‌های تقویتی نسبت به نمونه‌های بدون تقویت تا حدود ۱۱۰ درصد افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی دیوار بنایی، کامپوزیت FRP، روش‌های جای‌گزین آماده سازی سطح، جداشدگی الیاف،آزمایش کشش قطری.

Investigation the Different Methods of Connecting GFRP Sheets to Ductility and In-Plane Behavor of Masonry Walls

M.R. Eftekhar M. Emami

Abstract *One of the ways that is conventional in the last two decades for seismic improvement and retrofit of concrete and masonry structures is using the various fiber reinforced polymers (FRP). Among the most important issues in reinforcement of masonry walls by FRP composites, there is debonding of FRP sheets from the surface of the wall. Therefore in the current study the effect of wall surface preparation methods on the bearing capacity and ductility of masonry walls strengthened with FRP sheets have been investigated specifically. While using alternative methods of surface preparation such as grooving, holes and nailing, indices of strength and behavior of reinforced wall under alternative methods of surface preparation have been studied. To achieve this aims, the number of 11 unreinforced masonry walls was constructed in the laboratory. These results show ductility index for reinforcement wall incrased 110 relative to unreinforced wall.*

Key Words Masonry Wall, GFRP Composite, Alternative Methods of Surface Preparation, Debonding, Diagonal Tensile Test.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۳/۳۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۳/۲۸ می‌باشد.

(۱) استادیار دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

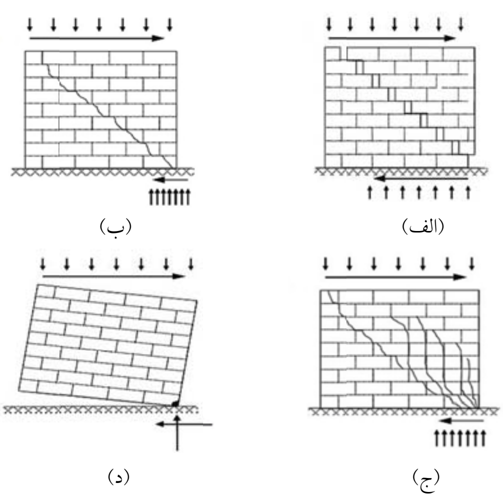
(۲) نویسنده مسئول دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

Email: m.emami@cv.iut.ac.ir

مقدمه

ساختمان‌های بنایی غیر مسـلح URM (Unreinforced Masonry) که شامل ساختمان‌های باسـتانی و فرهنگـی نیز می‌شوند، بخش عمده‌ای از ساختمان‌های موجود در دنیا را تشکیل می‌دهند [1,2]. بررسی زلزله‌های گذشـته نشان می‌دهد که علاوه بر آسیب پذیری شدید، احتمـال بروز تلفات جانی نیز در این سـاختمان‌هـا بسـیار زیـاد است [3,٤]. دیوارهای بنـایی بـه عنـوان عناصـر اصـلی ساختمان‌های بنایی، نقش بسیار مهمـی در بـاربری ایـن نوع سازه‌ها ایفـا مـی‌کننـد. دیوارهـای سـاخته شـده از مصالح آجری و مانند آن (بلوک بتنی، سنگ، خشت) از مقاومت فشاری نسبتاً مناسبی برخوردارند امـا در برابـر برش و کشش ضعیف بوده و معمولاً عملکـردی تـرد و شکننده دارند. از این‌رو مقاوم سازی این دیوارهـا بـرای مقابله با نیروهای جانبی امری ضـروری مـی‌باشـد [5]. برای بهسازی لرزه‌ای سازه‌های بنایی غیر مسـلح روش-های تقویتی زیادی وجود دارد. از جمله‌ی این روش‌هـا می‌توان بـه اسـتفاده از بادبنـدهای فـولادی، اسـتفاده از توری مرغی و بـتن پاشـی سـطح دیـوار (شـاتکریت)، تعبیه‌ی دیوار برشی بتنی، تزریـق مـلات (گـروت) و ... اشاره کرد. روش‌های مرسوم تقویـت عمـدتاً منجـر بـه معایبی از قبیل کاهش فضاهای مفید ساختمان، افـزایش جرم سازه، تأثیر بر معمـاری و ظـاهر سـازه و ... مـی-شوند؛ اما یکی از روش‌هایی که اخیراً برای مقاوم‌سـازی ساختمان‌های بنایی و بتنی متداول شده است، استفاده از انواع الیاف مسلح پلیمری یا FRP (Fiber Reinforced Polymers) است. کامپوزیـت‌هـای FRP بـا دارا بـودن مقاومت کششـی بـالا، شـکل پـذیری مناسـب، نسـبت مقاومت به وزن زیاد و سهولت اجرا می‌تواننـد بسـیاری از معایب دیگر روش‌های تقویـت را برطـرف کننـد. از جمله مهمترین معایب استفاده از الیاف FRP می‌توان به آسیب‌پذیر بودن رزین موجـود در کامپوزیـت FRP بـه اشعه فرابنفش و فروپاشی الیاف FRP در برابـر گرمـای زیاد اشاره نمود. برای اتصـال ورق‌هـای کـامپوزیتی بـر سطح دیوار از الگوهـای مختلفـی اسـتفاده مـی‌شـود. از جملهٔ این الگوها می‌توان به نوارهای افقی، قائم، شبکه-ای و قطری اشاره کرد. بر اسـاس مطالعـهٔ تحقیـق‌هـای صورت گرفته، در بین الگوهای مختلف اتصال الیاف به سطح دیوار پیکربندی قطری نتایج بهتری نسبت به دیگر پیکربندی‌ها دارد [6-11].

به طور کلـی مـی‌تـوان مکـانیزم‌هـای گسـیختگی دیوارهای بنـایی غیرمسـلح را بـه دو دسـتهٔ گسـیختگی برون صفحه و گسـیختگی درون صـفحه تقسـیم بنـدی نمود [۱۲]. مدهای رایج شکست دیوارهای بنـایی غیـر مسلح تحت بارگذاری درون صفحه‌ای شامل گسیختگی در اثر لغـزش بنـدهای مـلات، تـرک‌خـوردگی قطـری، حرکت گهواره‌ای یـا بلنـد شـدگی دیـوار و هـم‌چنـین شکست فشـاری پاشـنه‌ی دیـوار مـی‌باشـد (شـکل ۱). مکانیزم شکست در این حالت‌ها به ابعاد دیوار، شـرایط تکیه‌گاهی، مقادیر بارهای قائم و افقی و مشخصات آجر و ملات بستگی دارد [13,14].

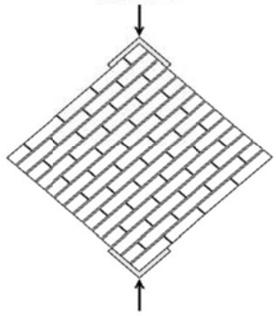


شکل ۱ حالت‌های مختلف شکست درون صفحه‌ی دیوار؛ الف) لغزش بندهای ملات؛ ب) ترک خوردگی قطری؛ ج) خردشدگی پنجه؛ د) بلند شدگی [14]

تحقیقات آزمایشگاهی بر روی دیوارهای بنایی در دو بخش بـرش درون صـفحه و خمـش بـرون صـفحه انجام می‌گیرد. در بخش خمـش بـرون صـفحه معمـولاً

بارگذاری با اعمال یک بار عمودی در وسط صفحه دیوار، و در بخش برش درون صفحه بارگذاری موازی با صفحه‌ی دیوار و به سه صورت: یکنواخت (Monotonic)، چرخه‌ای(Cyclic) و لرزه‌ای(Seismic) به دیوار اعمال می‌شود [15-17]. در این تحقیق به منظور آزمایش دیوارهای بنایی از بارگذاری یکنواخت (کشش قطری) مطابق با آیین‌نامهٔ ASTM E 519 [18] استفاده شده است. در این نوع بارگذاری یک بار فشاری در راستای قطر دیوار مربعی شکل به آن اعمال می‌گردد (شکل ۲).

در تحقیق حاضر ورقه‌های FRP به شکل ضربدری (x) و تنها در قطر کششی بر روی نمونه‌ها نصب می‌شود. از جمله مسائل مهم در تقویت دیوارهای بنایی با استفاده از FRP نحوهٔ آماده سازی سطح دیوار به منظور اتصال الیاف می‌باشد. در روش‌های متداول اتصال الیاف FRP به سطح دیوار، ابتدا تورفتگی بندهای ملات به وسیله مصالح مناسب پر می‌گردد. سپس با استفاده از سنگ فرز سطح دیوار صاف شده و در مرحله‌ی بعد گرد و غبار موجود بر روی سطح دیوار به وسیله فشار هوا تمیز می‌شود و در ادامه، الیاف به کمک رزین‌های اپوکسی بر سطح دیوار نصب می‌شود. تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که این شیوه‌ی اتصال الیاف، جداشدگی زودرس مصالح کامپوزیتی را از سطح دیوار در بر دارد [6-11]. در ادامه به عمده تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی پانل‌های بنایی تقویت شده با ورقه‌های کامپوزیتی اشاره خواهد شد.



شکل ۲ بارگذاری کشش قطری مطابق با ASTM E 519 [15]

والوزی و همکاران [19]، تأثیر پیکربندی‌های مختلف اتصال FRP در یک و دو طرف سطح دیوار را تحت بارگذاری کشش قطری مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی مشخص کرد که استفاده از FRP تنها در یک سطح دیوار (تقویت به صورت نامتقارن)، نه تنها مقاومت برشی نهایی دیوار را افزایش نداده، بلکه در بعضی نمونه‌ها کاهش مقاومت نیز مشاهده شده است.

استراتفورد و همکاران [9]، پانل‌های بنایی تقویت شده با استفاده از صفحات GFRP در یک وجه دیوار را تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار دادند. نتایج این آزمایشات نشان داده است که همه‌ی نمونه‌ها به جز نمونه پانل آجری بدون تقویت، با گسترش سریع ترک‌های قطری به صورت پله‌ای در امتداد بندهای ملات گسیخته شدند. همچنین گسیختگی در نمونه‌های تقویت شده، با جداشدگی الیاف GFRP از سطح دیوار گزارش شده است.

مارکاری و همکاران [7]، پانل تقویت نشده و پانل‌های تقویت شده به وسیله‌ی دو نوع الیاف شیشه و کربن را تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار دادند. هدف از این تحقیق آزمایشگاهی، بررسی اثر الیاف پلیمری بر افزایش ظرفیت جابه‌جایی افقی دیوارهای بنایی گزارش شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، تغییرشکل جانبی نهایی در نمونه‌های تقویت شده با الیاف کربن ۱۵۰ درصد افزایش داشته؛ اما این افزایش در نمونه‌های تقویت شده با الیاف شیشه بین ۹۰ تا ۱۶۰ درصد متغیر بوده است. هم‌چنین جداشدگی نوارهای تحت کشش، با ظهور ترک‌های زیادی در سطح دیوار نیز گزارش شده است.

پترسن و همکاران [20]، رفتار درون صفحهٔ پانل-های بنایی تقویت شده به وسیلهٔ نوارهای CFRP در قالب تکنیک NSM را مطالعه نمودند. هدف از تحقیق صورت گرفته بررسی راستاهای مختلف اتصال الیاف (افقی، عمودی و ترکیبی) روی سطح دیوار بر ظرفیت باربری و شکل پذیری دیوارهای بنایی تقویت شده

اعلام شده است.

کلالی و کبیر [21]، پانل‌های بنایی تقویتی و غیر مسلح را در معرض بارگذاری کشش قطری قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که علی‌رغم میزان یکسان الیاف GFRP مورد استفاده در هر دو پیکربندی قطری و شبکه‌ای، استفاده از پیکربندی قطری نسبت به پیکربندی شبکه‌ای تأثیر بیشتری در افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری دیوارهای بنایی دارد.

در خصوص نحوهٔ اتصال الیاف FRP به سطح دیوارهای با مصالح بنایی و اثرات آماده سازی سطح اتصال بر عملکرد دیوارهای تقویت شده مطالب قابل توجهی در ادبیات موضوع دیده نمی‌شود؛ ولی به نظر می‌رسد که موضوع فوق از جهات زیادی مشابه با تأثیر آماده سازی سطوح بتنی نظیر تیرها و دال‌های بتن آرمه برای اتصال با صفحات تقویتی است. از جدیدترین راه‌-کارهای ارائه شده برای سطوح بتنی می‌توان به روش شیار زنی، توسط مستوفی نژاد و محمودآبادی [۲۲] و روش سوراخ زنی، توسط افتخار و یعقوبی [۲۳] به عنوان جایگزین‌هایی در آماده‌سازی سطح بتن جهت جلوگیری از جدا شدگی ورق FRP، اشاره کرد.

هدف این تحقیق، بررسی انواع روش‌های اتصال صفحاتFRP به سطح دیوار به منظور جلوگیری و یا به تعویق انداختن پدیده‌ی جدا شدگی می‌باشد. آماده سازی سطحی، سوراخ زنی، سوراخ زنی به همراه میخ-گذاری درون سوراخ‌ها و شیار زنی از جمله روش‌هایی است که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

برنامهٔ آزمایشگاهی

مشخات مصالح مورد استفاده و نحوهٔ ساخت نمونه‌ها

آجر مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها از نوع مجوف (سوراخ دار)، و **ملات** مصرفی از نوع ملات ماسه سیمان با نسبت حجمی ۳ به ۱ مطابق آیین‌نامه ایران [۲٤] و با نسبت آب به سیمان ۰/۵ انتخاب شده است.

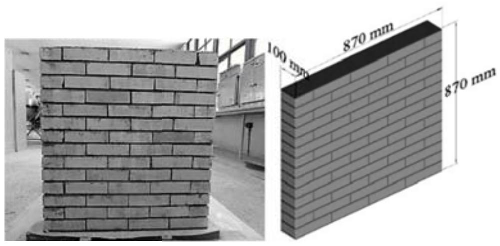
مشخصات مکانیکی مصالح بنایی مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها در جدول (۱) آورده شده است. الگوی ساخت نمونه‌ها بر اساس الگوی رایج کشور مطابق شکل (۳) انتخاب شده است. با توجه به محدودیت حداکثر باز شدگی دهانه ی جک به میزان ۱۷۰۰ میلی متر در آزمایشگاه، ابعاد نمونه های آزمایشی ۱۰۰*۷۸۰*۷۸۰ میلی متر انتخاب شد تا ضمن سهولت حمل و جا به جایی نمونه ها، مجموع قطر دیوار و تجهیزات قرار گرفته بر روی آن ها از عدد ۱۷۰۰ میلی متر تجاوز ننماید. ابعاد آجر مصرفی در این تحقیق در ساخت پانل های بنایی ۵۵*۱۰۰*۲۱۵ میلی متر می باشد که قبل از استفاده، به مدت ۲۰ دقیقه درون آب قرار گرفته اند. ضخامت بندهای افقی ملات ۸ میلی‌متر و ضخامت بندهای عمودی ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای یکنواخت بودن بندهای افقی ملات از یک شابلون با جزئیات نشان داده شده در شکل (٤)، استفاده شده است. بر اساس استاندارد ASTM E 519 دیوارها بایستی به مدت ۲۸ روز در شرایط آزمایشگاهی با درجه حرارتی بین ۱٦ تا ۳۲ درجه‌ی سانتی‌گراد و درصد رطوبت بین ۲۵ تا ۷۵ نگهداری شوند [18].

جدول ۱ مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها

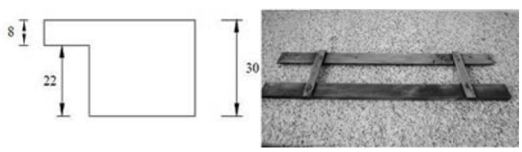
نوع مصالح	مشخصه	کد آیین‌نامه ASTM	مقدار (MPa)
آجر	مقاومت فشاری	[25] C 67	۱٦/٤
	مقاومت کششی		٦/۹۲
ملات	مقاومت فشاری بدون عمل‌آوری	C 109 [26]	٦/۸
	مقاومت فشاری ۷ روزه		۱٦/۳
	مقاومت فشاری ۲۸ روزه		۲۲/۹
منشور بنایی	مقاومت فشاری	C 1314 [27]	۲۲/۹
	مدول الاستیسیته		۳۹۹۸

نحوهٔ تقویت، طبقه‌بندی و آزمایش نمونه‌ها

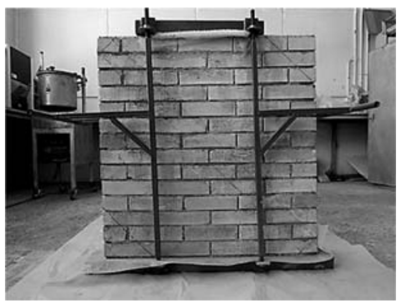
به منظور راحتی حمل و اطمینان از عدم فروپاشی دیوارها در هنگام جابه‌جایی، یک سیستم نگهدارنده برای حمل آن‌ها ساخته شده است. این سیستم نگهدارنده شامل دو عدد ناودانی نمره ۱۲ با طول‌های ۱۰۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر و ٤ عدد میله‌ی فولادی با طول ۱۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۵). طول و عرض نوارهای FRP به کار رفته در تقویت همه‌ی نمونه‌ها یکسان و به ترتیب برابر ۱۱۰۰ و ۷۵ میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین در همه‌ی نمونه‌های تقویتی، الیاف FRP تنها در قطر کششی دیوار و در هر دو وجه استفاده شده است. در این تحقیق الیاف FRP به روش لایه‌ای مرطوب(Wet Layup) بر روی سطح دیوار نصب شده است. در جداول (۲) و (۳) مشخصات مصالح مورد استفاده در تقویت نموته‌ها آورده شده است.



شکل ۳ الگوی ساخت نمونه‌ها



شکل ٤ شابلون بندکشی و جزئیات سطح مقطع آن



شکل ۵ سیستم حمل دیوار

جدول ۲ مشخصات الیاف FRP مورد استفاده برای تقویت نمونه‌ها

نام	مقاومت کششی نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته کششی (GPa)	ضخامت ورق (mm)	کرنش نهایی ورق (٪)
الیاف شیشه نوع I	۲۹۰۰	N.A.	۰/۱۷	۲/۱
الیاف شیشه نوع II	۳٤۰۰	۷٦	۰/۱۷	۲/۸

جدول ۳ مشخصات چسب مورد استفاده برای تقویت نمونه‌ها

نام	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته کششی (MPa)
اپوکسی Sikadur-330	۳۰	٤۵۰۰

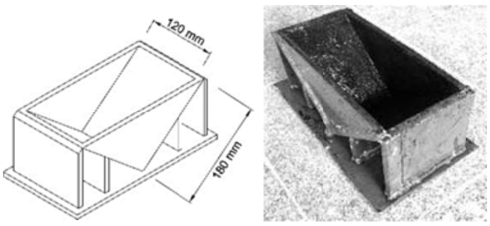
به منظور بررسی اهداف تحقیق، ۱۱ عدد دیوار بنایی ساخته شده در ٦ گروه تقسیم‌بندی شده‌اند. گروه اول شامل ٤ عدد دیوار بنایی غیرمسلح (بدون تقویت) می‌باشد. گروه دوم شامل ۲ عدد دیوار تقویت شده با استفاده از دو نوع الیاف شیشه، به روش بدون آماده سازی سطحی WS (Without Surface Preparation) می‌باشد. گروه سوم در بر دارنده‌ی یک دیوار بنایی است، که با استفاده از الیاف شیشه‌ی نوع II و به روش آماده سازی سطحی EBR (Externally Bonded Reinforcing) تقویت شده است. در گروه چهارم تعداد دو دیوار بنایی به روش سوراخ زنی تقویت شده است. در این گروه دیوارها با استفاده از دو نوع الیاف شیشه تقویت شده‌اند. قطر و عمق سوراخ‌ها به ترتیب ۸ و ۷ میلی‌متر بوده و در دو ردیف ۲۲تایی و با فاصله‌های طولی و عرضی ۵۰ و ٤۰ میلی‌متر در راستای قطر کششی دیوار ایجاد شده‌اند. در هر یک از گروه‌های پنجم و ششم نیز یک نمونه دیوار بنایی وجود دارد که با استفاده از روش میخ گذاری (میخ‌های فولادی) و شیار زنی تقویت شده‌اند. طرح کلی نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق در جدول (٤) آورده شده است. در

این جدول نمونه‌های تقویت نشده با نام URM، و نمونه‌های تقویت شده با حروف RM (Reinforced Masonry) نشان داده شده است. همچنین حرف G در نمونه‌های تقویت شده برای نوع الیاف شیشه، حرف E برای حالت آماده سازی سطحی، حرف h برای روش سوراخ زنی و حرف N برای روش میخ گذاری و حرف g معرف روش شیار زنی است. نمادهای I و II نیز برای نوع الیاف شیشه‌ی I و نوع الیاف شیشه‌ی II استفاده شده است.

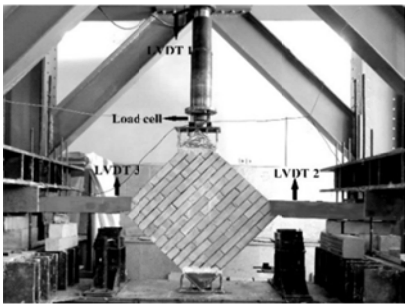
دستگاه و تجهیزات آزمایش نمونه‌ها

همان‌طور که در بخش‌های گذشته نیز اشاره شد، در این تحقیق، دیوارهای بنایی تحت بارگذاری کشش قطری آزمایش می‌شوند. بنابراین برای اعمال این نوع بارگذاری، قطعاتی فولادی تحت نام کفشک بارگذاری (شکل ٦–الف) مطابق با آیین‌نامه‌ی ASTM E 519 ساخته شده است [18]. دستگاه مورد استفاده جهت آزمایش نمونه‌ها، از یک قاب باربر، یک جک قائم با ظرفیت ۲۵۰۰ کیلو نیوتن، یک محور اعمال بار دو قسمتی و یک سیستم هیدرولیک تشکیل شده است. سیستم کنترلی دستگاه به یک رایانه متصل شده است. پردازش اطلاعات در این دستگاه توسط نرم‌افزار (Data Acquisition & Control System) DACS انجام می‌گیرد. این نرم‌افزار قابلیت هدایت آزمایش با دو روی‌کرد کنترل نیرو یا کنترل تغییرمکان و پردازش هر گونه گزارش مربوط به سنجش نیرو، کرنش و تغییرطول را داراست. در این تحقیق بار توسط جک هیدرولیکی به صورت کنترل تغییرمکان و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه عمود بر راستای ورق تقویتی به گوشه‌ی دیوار اعمال می‌شود. در این حالت در راستای طولی الیاف نیروی کششی ایجاد خواهد شد. برای سنجش تغییرطول قائم دیوار (در راستای قطر فشاری) از یک LVDT، و برای سنجش میزان افزایش طول دیوارها (در امتداد قطر کششی) از دو عدد LVDT در گوشه‌های سمت چپ و راست دیوار استفاده شده است.

به منظور محافظت از LVDT در راستای قطر کششی در برابر خطر ریزش دیوار، محفظه‌ای از قوطی-های فولادی اطراف آن‌ها قرار داده شده است. علاوه بر سه تغییرطول سنج فوق، یک عدد LVDT جهت اطمینان از عدم تغییرشکل برون صفحه، در مرکز دیوار و عمود بر آن نصب شده است. همچنین برای سنجش میزان بار وارده از یک عدد بارسنج (Load Cell) استفاده شده است. نمای کلی سیستم بارگذاری و نحوهٔ استقرار دیوار در درون دستگاه و همچنین طرز قرار گرفتن LVDT ها و بارسنج در شکل(٦–ب) نشان داده شده است.



(الف)



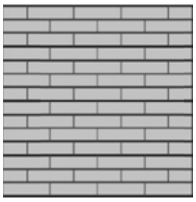
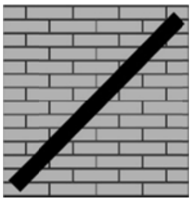
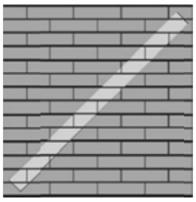
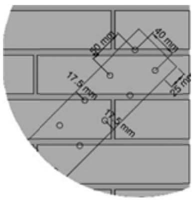
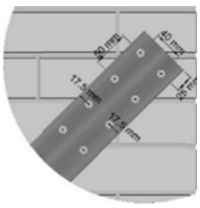
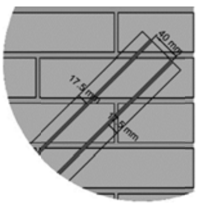
(ب)



(ج)

شکل ٦ الف) کفشک بارگذاری؛ ب) چیدمان دستگاه، نحوه‌ی قرارگیری نمونه و تجهیزات متصل به دیوار؛ ج)LVDT کار گذاشته شده جهت تعیین تغییرمکان برون صفحه

جدول ٤ طرح کلی نمونه‌ها

گروه	کد نمونه	روش تقویت	تصویر
۱	URM-1 URM-2 URM-3 URM-4	بدون تقویت	
۲	RM-G-I RM-G-II	با استفاده از روش بدون آماده سازی سطح (WS) و به وسیلهٔ دو نوع الیاف شیشهٔ نوع I و نوع II	
۳	RM-GE	با استفاده از روش آماده سازی سطحی (EBR) و به وسیلهٔ الیاف شیشهٔ نوع II	
٤	RM-Gh-I RM-Gh-II	با استفاده از روش سوراخ زنی (HM) و به وسیلهٔ الیاف شیشهٔ نوع II، قطر و عمق سوراخ‌ها ۸ و ۷ میلی‌متر	
۵	RM-GhN	با استفاده از روش سوراخ زنی به همراه میخ گذاری (N) و به وسیلهٔ الیاف شیشهٔ نوع II، قطر و عمق سوراخ‌ها ۸ و ۷ میلی‌متر	
٦	RM-Gg	با استفاده از روش شیار زنی طولی (GM) و به وسیلهٔ الیاف شیشهٔ نوع II، عرض و عمق شیارها ٤ و ۷ میلی‌متر	

نتایج آزمایشات

در این بخش، تحلیل و ارزیابی نتایج گروه‌های شش‌گانه در قالب ظرفیت باربری در لحظهٔ حداکثر و نهایی، شکل پذیری، قابلیت اتلاف انرژی، نوع گسیختگی و ظرفیت تغییرطول قطرهای فشاری و کششی در باربری حداکثر و نهایی نمونه‌ها آورده شده است.

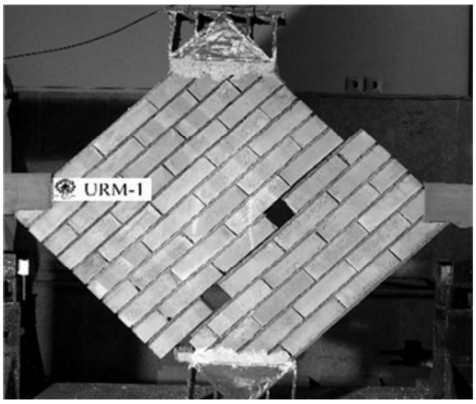
نمونه‌های بدون تقویت

نتایج مربوط به بار حداکثر قابل تحمل در دیوارهای بنایی تقویت نشده (نمونه‌های شاهد) به همراه

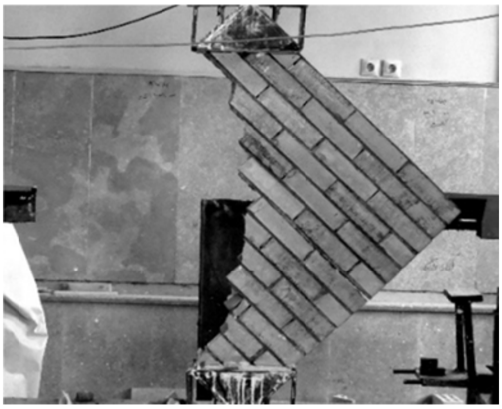
تغییرطول اقطار فشاری و کششی متناظر با این ظرفیت باربری در جدول ۵ نشان داده شده است. معمولاً نمونه‌های آزمایشگاهی پس از رسیدن به نقطه‌ی حداکثر باربری، در شاخه‌ی نزولی منحنی بار- تغییرمکان با دو رفتار متفاوت به زوال و گسیختگی نهایی می‌رسند. در برخی نمونه‌ها افت و کاهش باربری در یک تغییرمکان بسیار کوچک حادث می‌شود که این حالت می‌تواند نشان دهنده‌ی رفتار ترد و شکست ناگهانی نمونه باشد. مد گسیختگی شکاف خوردگی قطر فشاری و خردشدگی پنجه‌ی فشاری در دیوارهای بنایی معمولاً در قالب این نوع شکست دسته‌بندی می‌شوند. این دسته از نمونه‌ها دارای نقطه‌ی شکست و زوال آزمایشگاهی می‌باشند و نقطه‌ی افت ناگهانی بار به عنوان نقطۀ باربری نهایی برای آن‌ها محسوب می‌شود. حالت زوال دیگر مربوط به نمونه‌هایی است که کاهش بار در شاخه‌ی نزولی منحنی بار- تغییرمکان به تدریج و همراه با تغییرات مرحله‌ای در ابعاد نمونه صورت می‌پذیرد. بلندشدگی دیوار و لغزش بندهای ملات در این تقسیم-بندی قرار می‌گیرند. در برخی از نمونه‌ها که نمودار فاقد نقطۀ شکست آزمایشگاهی است، نقطه‌ی متناظر با ۸۰ درصد حداکثر باربری نمونه در شاخه‌ی نزولی نمودار، مطابق با آیین‌نامه‌ی ASTM E 2126، به عنوان نقطه‌ی نهایی در نظر گرفته شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش مقدمه، به نظر می‌رسد که نوع زوال در نمونه‌های تقویت نشده‌ی به صورت یکی از دو مد لغزش برشی در راستای بندهای افقی ملات و یا شکست قطری حادث می‌شود. بدیهی است وجود اتصال سرد در دیوار و یا عدم چسبندگی ملات و آجر که می‌تواند در اثر ضعف مسائل اجرایی و یا سوختگی ملات ایجاد شود، می‌توانند دلایلی بر گسیختگی دیوار به صورت لغزش در راستای بندهای افقی ملات باشد (شکل ۷- الف). هم‌چنین اجرای مناسب دیوار، استفاده از ملات مناسب و ایجاد چسبندگی مناسب بین آجر و ملات می‌تواند منجر به شکست قطری دیوار گردد (شکل ۷- ب). عدم حصول شرایط مناسب برای پیوستگی بین مراحل مختلف اجرای دیوار سبب شد تا در برخی از ردیف های آجرکاری در نمونه های URM-1 و UMR-2 پدیدۀ اتصال سرد در درزهای ملات ایجاد شود. وجود اتصال سرد در این درزها، مقدمات شکست لغزشی را در این دو نمونه دیوارهای بنایی فراهم ساخت. مقایسه‌ی نمونه‌های گسیخته شده با شکست لغزشی (نمونه‌های URM-1 و URM-4) با نمونه‌های گسیخته شده با شکست قطری (دیوارهای URM-2 و URM-3) در جدول (۵) نشان می‌دهد که بار حداکثر قابل تحمل در نمونه‌های با شکست لغزشی به مراتب کمتر از نمونه-های با شکست قطری است. علاوه بر آن علی رغم کاهش میزان باربری در نمونه های با شکست لغزشی، تغییر طول قطر در این نمونه ها بیشتر از نمونه های با شکست قطری است که می تواند بیانگر شکل پذیری بیشتر نمونه های با شکست لغزشی باشد. مقایسه‌ی تغییرطول‌های قطر فشاری و کششی در باربری‌های حداکثر و نهایی برای نمونه‌های با شکست لغزشی نشان می‌دهد که نرخ افزایش تغییرطول قطر کششی نسبت به قطر فشاری بیشتر است. این مطلب به نوعی نشان دهنده‌ی وقوع لغزش بندهای افقی ملات در فاصله بین باربری حداکثر و نهایی است. علاوه بر آن مقادیر تغییرطول قطر فشاری نسبت به مقادیر متناظر برای قطر کششی در تمام نمونه‌ها بیشتر است. در این تحقیق متوسط باربریِ حداکثرِ نمونه‌هایی که به صورت لغزش بندهای افقیِ ملات گسیخته شده‌اند برابر ۷۳/۱ کیلو نیوتن و متوسطِ باربریِ حداکثر، برای نمونه‌هایی که با شکست قطری گسیخته شده‌اند معادل ۱۳۳/٦ کیلو نیوتن می‌باشد.

نمودار بار- تغییرطول قطر فشاری برای سه نمونه از دیوارهای گروه اول در شکل (۸) رسم شده است. به دلیل اشکال به وجود آمده در ثبت اطلاعات مربوط به نمونه‌ی URM-4، منحنی بار- تغییرطول قطر فشاری این نمونه ترسیم نشده است. با توجه به نمودار شکل (۸) ملاحظه می‌شود که نمونه‌های گسیخته شده با شکست قطری، رفتار بار- تغییرطول مشابهی را تجربه نموده‌اند. این دو نمونه تا لحظه‌ی اولین ترک خوردگی،

دارای رفتاری نسبتاً خطی می‌باشند. اما در میزان بار حدود ۱۲۰ کیلو نیوتن ($۰/۹\ P_{max}$)، با ایجاد ترک‌هایی قائم در راستای قطر فشاری، سختی نمونه‌ها کاهش یافته و دیوارها با سختی کمتر تا لحظه‌ی گسیختگی به باربری ادامه داده‌اند. علی‌رغم شباهت رفتاری دو دیوار URM-2 و URM-3، مد گسیختگی لغزشی موجب رفتاری متفاوت در دیوار URM-1 نسبت به دو نمونه‌ی دیگر شده است. دیوار URM-1 در بار حدود ۳۰ کیلو نیوتن با لغزش در امتداد سه بند متوالی دچار کاهش سختی شده است. در حالت بروز لغزش، با وجود اعمال فشار از طرف جک به نمونه، دیوار به جای مقاومت در برابر فشار وارده، با لغزش در امتداد بندهای ملات، خود را از زیر فشار دستگاه رها می‌کند. این پدیده سبب افزایش تغییرطول قطرهای کششی و فشاری و نیز کاهش میزان باربری نمونه می‌شود.

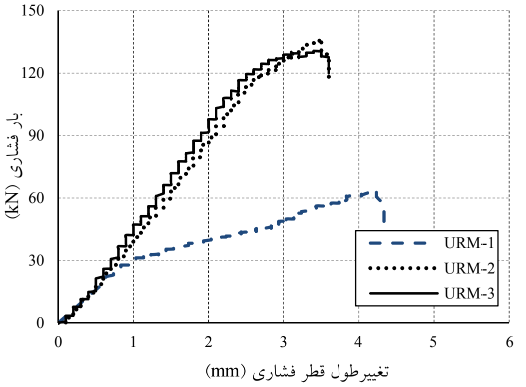


(الف)



(ب)

شکل ۷ الف) گسیختگی لغزشی در دیوار URM-1؛ ب) گسیختگی قطری در دیوار URM-2



شکل ۸ نمودار بار– تغییرطول قطر فشاری ترسیم شده برای نمونه های بدون تقویت

جدول ۵ نتایج مربوط به نمونه‌های بدون تقویت (گروه اول)

نمونه	بار حداکثر			مد گسیختگی
	مقدار بار (kN)	تغییرطول قطر فشاری (mm)	تغییرطول قطر کششی (mm)	
URM-1	٦٣/١	٤/٢	٢/٢	لغزشی
URM-2	١٣٦/٣	٣/٥	٠/٨	قطری
URM-3	١٣٠/٩	٣/٥	١/٦	قطری
URM-4	٧٩/٥	–	–	لغزشی

نمونه‌های تقویت شده

مقادیر شاخص‌های لرزه‌ای دیوار نظیر ظرفیت باربری حداکثر، جذب انرژی، شکل پذیری و کرنش برشی نمونه‌های تقویت شده، به همراه درصد افزایش این مقادیر نسبت به متوسط این شاخص‌ها در نمونه‌های بدون تقویت در جدول (٦) آورده شده است. در ادامه به هر یک از این شاخص‌ها به صورت مجزا پرداخته می‌شود.

نحوهٔ زوال

مد گسیختگی مشاهده شده برای اغلب نمونه‌های

تقویت شده به صورت شکاف خوردگی قطر فشاری به همراه جداشدگی الیاف کامپوزیتی از سطح دیوار می-باشد. در دو نمونه‌ی RM-G-II و RM-Gh-I که به ترتیب با استفاده از روش‌های بدون آماده سازی سطح و سوراخ زنی تقویت شده‌اند، گسیختگی به صورت لغزش بندهای افقی ملات همراه با جداشدگی الیاف FRP حادث شده است. به طور کلی بر اساس آن‌چه در هنگام آزمایش نمونه‌های تقویتی مشاهده شد، در میزان باریری بین ۷۰ تا ۸۰ درصد بار حداکثر، جدا شدگی موضعی نوارهای GFRP در وسط دیوار آغاز شده و با افزایش بار وارده، همراه با افزایش عرض ترک‌ها، جدا شدگی نیز به آرامی به طرف یکی از دو انتهای نوار تقویتی حرکت می‌کند. سرانجام زوال نهایی دیوار در اکثر نمونه‌ها، با جدا شدگی کامل نوارهای تقویتی در یک انتها عملی شده است. با بررسی نوارهای تقویتی جدا شده از سطح دیوار، لایه‌ای نازک از آجر و ملات در سطح الیاف دیده می‌شود. این مسئله نشان می‌دهد که چسب استفاده شده برای اتصال الیاف FRP به سطح دیوار مناسب بوده و تنش‌های برشی ایجاد شده در سطح دیوار را به خوبی به الیاف منتقل کرده است. هم-چنین وجود لایه‌ای از آجر و ملات بر سطح نوارهای تقویتی بیانگر ضعف نسبی آجر در تحمل تنش‌های برشی یا کششی نسبت به سایر مصالح ناحیه‌ی اتصال نظیر چسب یا ورق تقویتی است. از این‌رو به نظر می-رسد برای تقویت دیوار و اتصال بهتر نوارهای کامپوزیتی به سطح، انتقال تنش‌های بین سطحی به لایه-های درونی‌تر آجر به عنوان یک گزینه‌ی مطرح، می-تواند اثرات مثبتی را در نمونه‌های با سوراخ زنی، شیار زنی و سوراخ زنی با میخ‌گذاری به دنبال داشته باشد. از دیگر نکات تمایز در نحوه‌ی زوال دیوارهای تقویت شده و تقویت نشده می‌توان به تعدد ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های تقویتی اشاره کرد. وجود الیاف تقویتی باعث می‌شود که به محض بروز ترک در دیوارهای بنایی، الیاف وارد عمل شده و از بازشدگی ترک ممانعت کند. مقاومت اضافه‌ی ایجاد شده در اثر وجود ورقه‌ی تقویتی، شرایط لازم برای ایجاد ترک‌های دیگر را در نمونه، تحت تداوم بارگذاری فراهم می‌کند. در شکل (۹) تصاویری از گسیختگی نهایی دیوارهای تقویتی و نوار FRP جدا شده از سطح دیوار نشان داده شده است.

شاخص شکل‌پذیری

معیار به کار گرفته شده در این تحقیق برای مقایسهٔ شکل پذیری نمونه‌ها، استفاده از شاخص شکل پذیری جابه‌جایی است. بر اساس تعریف، این شاخص از نسبت جابه‌جایی نهایی به مقدار جابه‌جایی در لحظهٔ تسلیم نمونه به دست می‌آید. رابطه‌ی(۱) برای محاسبهٔ این شاخص به کار گرفته می‌شود.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_{u}}{\Delta_{yield}} \quad (۱)$$

در رابطـهٔ (۱)، Δ_u جابـه‌جـایی در لحظـهٔ بـاربری نهایی، و Δ_{yield} میزان جابه‌جایی در لحظـهٔ تسـلیم مـی-باشد. در تحقیق حاضر بـرای تعریـف نقطـهٔ تسـلیم، از دستورالعمل آیین‌نامـه‌ی ASTM E 2126 [28] اسـتفاده شده است. همان‌طور که در جدول (٦) مشخص اسـت نمونه‌ی تقویت شده بـا اسـتفاده از روش مـیخ گـذاری (RM-GhN) و نمونه‌ی تقویتی با استفاده از روش شیار زنی (RM-Gg) شاخص شکل پذیری نمونه‌های بـدون تقویت را به میزانی حدود ۱۱۰ درصد افـزایش داده‌انـد. این میزان افزایش شکل پذیری نشان دهنده‌ی عمل‌کـرد مناسب دو روش مذکور در انتقال تنش‌های بین دیوار و کامپوزیت FRP می‌باشد. از بین نمونه‌های تقویت شـده در این تحقیق نمونه‌ی تقویت شده بـا اسـتفاده از روش بدون آماده سازی (RM-G-I)، کمترین تأثیر در افـزایش شکل پذیری دیوارهای بنایی را به خود اختصـاص داده است.

جدول ٦ مقادیر شاخص‌های لرزه‌ای مربوط به نمونه‌های تقویت شده و درصد افزایش آن‌ها نسبت به نمونه‌های بدون تقویت

شماره گروه	کد نمونه	ظرفیت باربری (kN)		جذب انرژی (N.m)		شکل پذیری		نوع گسیختگی
		مقدار	درصد افزایش	مقدار	درصد افزایش	مقدار	درصد افزایش	
۱	AVE-URM-1	۷۳/۱	–	۱٦٤/۸	–	۱/۳۸	–	شکست لغزشی
	AVE-URM-2	۱۳۳/٦	–	۲۳۸/٤	–	۱/۵۱	–	شکست قطری
۲	RM-G-I	۱۳۷/۳	۲/۸	۵۱۷/۳	۱۱۷	۲/۰۲	۳۳/۸	شکست قطری+ جداشدگی FRP
	RM-G-II	۱۱۹/۸	٦۳/۸	۵٤٤/۱	۱۲۸	۲/۵۸	۷۰/۹	شکست لغزشی+ جداشدگی FRP
۳	RM-GE	۱٤۱/٦	٦	۷٦۹/۵	۲۲۳	۲/۹۲	۹۳/٤	شکست قطری+ جداشدگی FRP
٤	RM-Gh-I	۱۱۱/۸	۵۳	٤۳٤/۹	۸۳	۲/۰۳	۳٤/۳	شکست لغزشی+ پارگی FRP
	RM-Gh-II	۱۲۹/۹	-۲/۷	٦۰۸/٦	۱۵۵	۲/۹	۹۲/۱	جداشدگی FRP+ فروریزش دیوار
۵	RM-GhN	۱۲۹/٦	۳	۷۷۸/۹	۲۲۷	۳/۱۷	۱۱۰	شکست قطری+ جداشدگی FRP
٦	RM-Gg	۱۳۳/٤	۰	۷۲۳/۲	۲۰۳	۳/۱۳	۱۰۷/۳	شکست قطری+ جداشدگی FRP

شاخص جذب انرژی

به نظر می‌رسد که شاخص شکل‌پذیری به تنهایی نمی‌تواند گویای عملکرد واقعی دیوار در بحث شکل‌پذیری باشد. از این‌رو در ادامه شکل‌پذیری نمونه‌ها از منظر شاخص جذب انرژی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای مقایسهٔ این شاخص، سطح زیر نمودار بار-تغییرمکان نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. در بین نمونه‌ها، نمونه‌ی تقویت شده به روش میخ گذاریِ درون سوراخ‌ها (RM-GhN) با افزایش ۲۲۷ درصدی، بیشترین تأثیر را در افزایش این پارامتر لرزه‌ای کسب کرده است. نمونه‌ی تقویت شده به روش شیار زنی طولی RM-Gg، تأثیر به سزایی بر شاخص جذب انرژی نمونه‌های بدون تقویت داشته و به میزان ۲۰۳ درصد این شاخص را افزایش داده است.

نمودارهای بار-تغییرمکان و تنش-کرنش

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب نمودار بار-تغییرمکان برای قطر فشاری و تنش برشی در مقابل کرنش برشی برای دیوارهای تقویت شده نشان داده شده است. برای محاسبه‌ی تنش برشی مطابق آیین‌نامه ASTM E 519، مؤلفهٔ افقی نیروی وارده به دیوار بر سطح مقطع آن مطابق رابطه‌ی(۲) تقسیم می‌گردد.

$$\tau = \frac{P \times \cos\theta}{A_n} \qquad (۲)$$

در این فرمول P میزان بار وارد شده، θزاویهٔ بندهای ملات با افق و A_n سطح مقطع خالص دیوار می‌باشد که از رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید.

$$A_n = \left(\frac{L+h}{2}\right)t \qquad (۳)$$

در رابطهٔ (۳) L و h به ترتیب عرض و ارتفاع دیوار و t ضخامت دیوار می‌باشد.

کرنش برشی نیز بر اساس مفاهیم مقاومت مصالح از رابطهٔ (٤) به دست می‌آید.

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \qquad (٤)$$

در رابطهٔ فوق ΔV وΔH به ترتیب تغییرطول در راستای قطرهای کششی و فشاری و gطول یکی از اقطار دیوار می‌باشد. همان‌طور که در نمودارها نیز ملاحظه می‌شود با وجودی که از دو نوع الیاف شیشه با خواص مکانیکی متفاوت در تقویت نمونه‌ها استفاده شده است، تفاوت چندانی در ظرفیت باربری نمونه‌ها حاصل نشده است؛ اما از نقطه نظر جابه‌جایی در

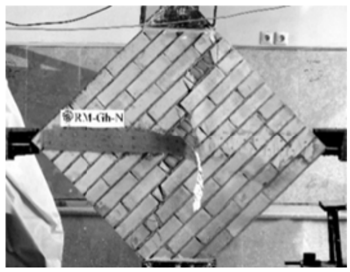
راستای اقطار فشاری و کششی، تمایزاتی بین نمونه‌های تقویتی با این دو نوع الیاف وجود دارد. به نظر می‌رسد برای تقویت دیوارهای بنایی، استفاده از کامپوزیت‌های با کرنش نهایی قابل تحملِ بزرگتر ضعف شکل پذیری دیوارهای بنایی را بهتر برطرف خواهند نمود. از دلایل آن می‌توان به جداشدگی دیرتر الیاف با کرنش نهایی بیشتر از سطح دیوار بنایی اشاره نمود. با دقت در نمودارهای بار- تغییرمکان و تنش- کرنش می‌توان پی برد که تغییرطول اقطار فشاری و کششی در نمونه‌هایی که با استفاده از روش‌های آماده سازی سطحی، سوراخ زنی، شیار زنی و سوراخ زنی به همراه میخ گذاری تقویت شده‌اند، نسبت به نمونه‌های تقویت شده به روش بدون آماده سازی سطح افزایش داشته‌اند.



نمونهٔ RM-G-I



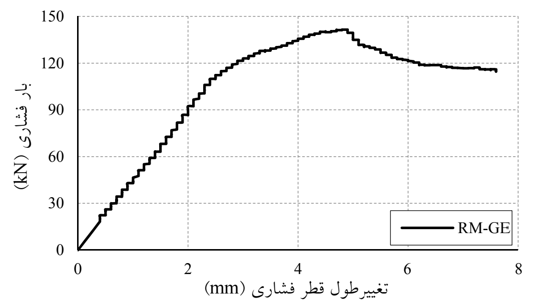
نمونهٔ RM-Gh-I

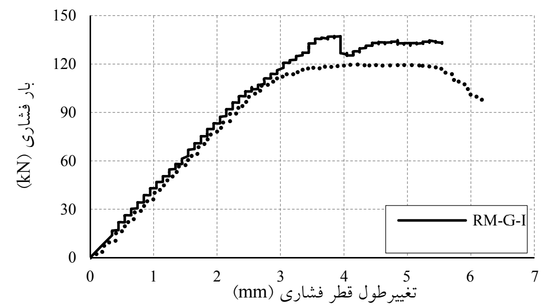


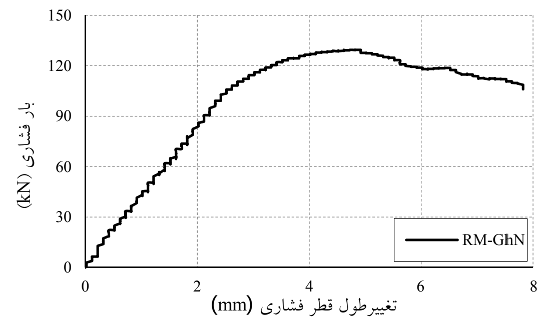
نمونهٔ RM-Gh-N

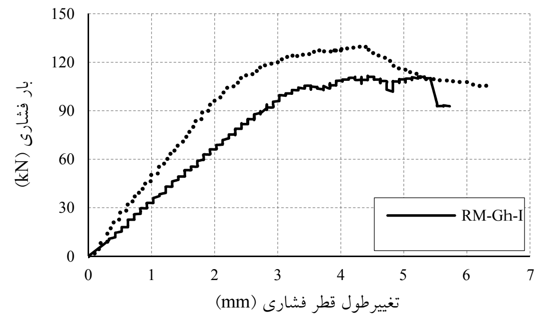
لایه‌ی آجر روی سطح الیاف جدا شده از سطح دیوار

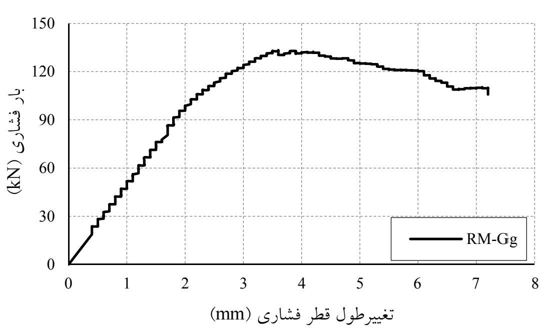
شکل ۹ تصویر نمونه‌های تقویتی پس از گسیختگی



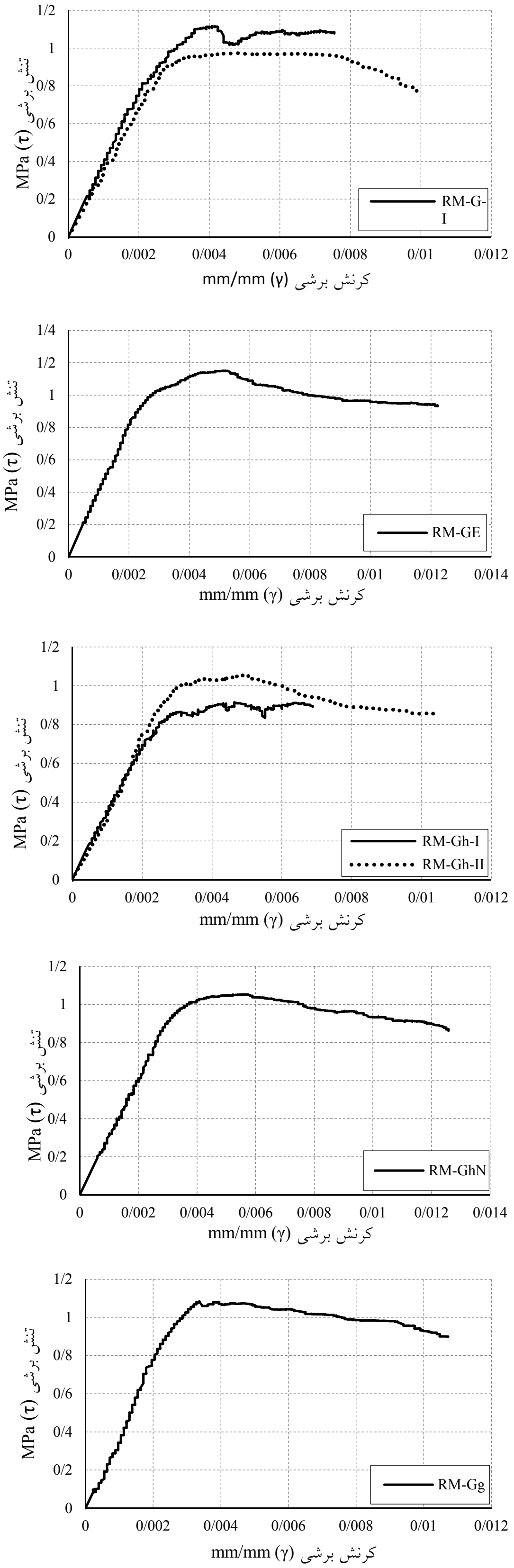








شکل ۱۰ نمودار بار- تغییرمکان مربوط به نمونه‌های تقویت شده



شکل ۱۱ نمودار تنش-کرنش برشی مربوط به نمونه‌های تقویت شده

خلاصه و نتیجه‌گیری

به منظور بررسی میزان تأثیر روش‌های مختلف اتصال الیاف FRP به سطح دیوارهای بنایی نظیر روش آماده سازی سطحی، سوراخ زنی، سوراخ زنی به همراه میخ گذاری و شیار زنی طولی، بر پارامترهای لرزه‌ای دیوارهای بنایی، تعداد ۱۱ نمونهٔ دیوار بنایی غیرمسلح با ابعاد ۸۷۰* ۸۷۰* ۱۰۰ میلی‌متر ساخته و تحت بارگذاری فشار قطری مورد آزمایش قرار گرفت. در برخی از روش‌های استفاده شده در این تحقیق نظیر سوراخ زنی، میخ گذاری و شیار زنی در میزان شکل پذیری و اتلاف انرژی دیوارها، نسبت به شیوهٔ آماده سازی سطحی، افزایش حاصل شده است. برخی از مهم‌ترین نتایج به دست آمده از انجام آزمایش فشار قطری بر روی دیوارهای بنایی تقویت شده و بدون تقویت را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد.

۱. ظرفیت باربری پانل‌های بنایی تقویت شده متأثر از نحوهٔ شکست و نوع زوال نمونه است، به طوری که در حالت شکست لغزشی، ظرفیت باربری نهایی دیوار بسیار کمتر از شکست قطری است.
۲. استفاده از کامپوزیت‌های FRP، ظرفیت باربری دیوارهای با مد گسیختگی لغزشی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. در این تحقیق علی‌رغم میزان کم کامپوزیت مصرفی، متوسط افزایش ظرفیت باربری حدود ٦٤ درصد می‌باشد.
۳. استفاده از روش سوراخ زنی به همراه میخ گذاری درون سوراخ‌ها در کل طول نوارهای GFRP، باعث بهبود پارامترهای لرزه‌ای دیوارهای بنایی می‌شود به گونه‌ای که شکل پذیری، اتلاف انرژی و کرنش نهایی در نمونه‌ی تقویت شده با این روش نسبت به نمونه‌ی بدون آماده سازی سطحی به ترتیب به میزان ۲۳، ٤۳ و ۲۷ درصد افزایش یافته است.
٤. ایجاد شیار طولی به عرض ٤ و عمق ۷ میلی‌متر بر سطح دیوار بنایی برای اتصال الیاف GFRP، یکی از

شیوه‌های مؤثر در افزایش پارامترهای لرزه‌ای دیوارهای بنایی بوده که باعث افزایشی ۲۱/۳ درصدی در شکل پذیری، ۳۳ درصدی در اتلاف انرژی و ۲۱/۲ درصدی در کرنش نهایی دیوارهای بنایی نسبت به روش بدون آماده سازی سطحی، شده است.

۵. روش سوراخ زنی برای اتصال بهتر ورق‌های تقویتی، ضمن داشتن نتایج مناسب در افزایش مقاومت و شکل پذیری از آلودگی زیست محیطی بسیار کمتری نسبت به سایر روش‌های آماده سازی برخوردار است.

مراجع

1. Li, T., Galati, N., Tumialan, J.G., and Nanni, A., "Analysis of unreinforced masonry concrete walls strengthened with glass fiber-reinforced polymer bars", *ACI Structural Journal-American Concrete Institute*, Vol. 102, No. 4, pp. 569-577, (2005).
2. Zhuge, Y., "FRP-retrofitted URM walls under in-plane shear: review and assessment of available models", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 14, No. 6, pp. 743-753, (2010).
3. ElGawady, M.A., Lestuzzi, P., and Badoux, M., "Aseismic retrofitting of unreinforced masonry walls using FRP", *Composites Part B: Engineering,* Vol. 37, No. 2, pp. 148-162, (2006).
4. مقدم, ح., "طرح لرزه‌ای سازه‌های بنایی", انتشارات دانشگاه صنعتی شریف, (۱۳۸۱).
5. Lang, K., "Seismic vulnerability of existing buildings", SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH, (2002).
6. Tinazzi, D., and Nanni, A, "Assessment of technologies of masonry retrofitting with FRP", Center for Infrastructure Engineering Studies, Univ. of Missouri-Rolla, Rolla, (2012).
7. Marcari, G., Manfredi, G., Prota, A., and Pecce, M., "In-plane shear performance of masonry panels strengthened with FRP", *Composites Part B Engineering*, Vol. 38, No. 7, pp. 887-901, (2007).
8. Alcaino, P., and Santa-Maria ,H., "Experimental response of externally retrofitted masonry walls subjected to shear loading", *Journal of Composites for Construction,* Vol. 12, No. 5, pp. 489-498, (2008).
9. Stratford, T., Pascale, G., Manfroni, O., and Bonfiglioli, B., "Shear strengthening masonry panels with sheet glass-fiber reinforced polymer", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 8, No. 5, pp. 434-443, (2004).
10. Mahmood, H., and Ingham, J.M., "Diagonal compression testing of FRP-retrofitted unreinforced clay brick masonry wallettes", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 15, No. 5, pp. 810-820, (2011).
11. Santa-Maria, H., Duarte, G., and Garib, A., "Experimental investigation of masonry panels externally strengthened with CFRP laminates and fabric subjected to in-plane shear load", *Thirteenth World*

conference Earthquake Engineering (13WCEE), Canadian Association for Earthquake Engineering and International Association for Earthquake Engineering (IAEE) Vancouver, Canada, (2004).

۱۲. نشریهٔ شمارهٔ ۳۷۶، "دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی غیرمسلح موجود"، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور،(۱۳۸۶).

13. Ehsani, M., Saadatmanesh, H., and Al-Saidy, A., "Shear behavior of URM retrofitted with FRP overlays", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 1, No. 1, pp. 17-25, (1997).

14. Roca, P., and Araiza, G., "Shear response of brick masonry small assemblages strengthened with bonded FRP laminates for in-plane reinforcement", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 5, pp. 1372-1384, (2010).

15. Zhou, D., Wang, J., and Lei, Z., "In-plane behavior of seismically damaged masonry walls repaired with external BFRP", *Composite Structures*, Vol. 102, pp. 9-19, (2013).

16. Borri, A., Castori, G., Corradi, M., and Sisti, R., "Masonry wall panels with GFRP and steel-cord strengthening subjected to cyclic shear: An experimental study", *Construction and Building Materials*, Vol. 56, pp. 63-73, (2014).

17. Mansouri, I., and Kisi, O., "Prediction of debonding strength for masonry elements retrofitted with FRP composites using neuro fuzzy and neural network approaches", *Composites: Part B*, Vol. 70, pp. 247-255, (2015).

18. American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages", ASTM E 519-02, (2002).

19. Valluzzi, M., Tinazzi, D., and Modena, C., "Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates", *Construction and Building Materials*, Vol. 16, No. 7, pp. 409-416, (2002).

20. Petersen, R.B., Masia, M.J., and Seracino, R., "In-plane shear behavior of masonry panels strengthened with NSM CFRP strips. I: experimental investigation", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 14, No. 6, pp. 754-763, (2010).

21. Kalali, A., and Kabir, M.Z., "Experimental response of double-wythe masonry panels strengthened with glass fiber reinforced polymers subjected to diagonal compression tests", *Engineering Structures*, Vol. 39, pp. 24-37, (2012).

۲۲. محمودآبادی, ا., شیار زنی به عنوان یک روش جایگزین آماده سازی سطحی بتن جهت جلوگیری از جداشدگی سطحی ورق FRP، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد سازه، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۸۸).

۲۳. یعقوبی, م.، سوراخ زنی به عنوان روشی جایگزین آماده سازی سطح در تیرهای بتنی تقویت شده با کامپوزیت‌های CFRP, پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد سازه، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۹۱).

۲۴. مقررات ملی ایران مبحث هشتم.، "طرح واجرای ساختمان‌های با مصالح بنایی"، وزارت مسکن وشهرسازی معاونت امور مسکن وساختمان، (۱۳۸۸).

25. American Society for Testing and Materials (ASTM)., "tandard test methods for sampling and testing

brick and structural clay tile", ASTM C 67, (2000).

26. American Society for Testing and Materials (ASTM)., "Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars", ASTM C 109/C 109M, (1999).
27. American Society for Testing and Materials (ASTM)., "Standard test method for compressive strength of masonry prisms", ASTM C 1314-03a, (2003).
28. American Society for Testing and Materials (ASTM)., "Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of walls for building", ASTM E 2126, (2005).